

УДК 669.3:621.7.044:620.186

**Н. Ю. Фролова<sup>1\*</sup>, В. И. Зельдович<sup>1</sup>, А. Э. Хейфец<sup>1</sup>,  
И. В. Хомская<sup>1</sup>, Е. Б. Смирнов<sup>2</sup>, А. А. Дегтярев<sup>2</sup>,  
Е. В. Шорохов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>2</sup>Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский  
научно-исследовательский институт технической физики, г. Снежинск

\*frolova@imp.uran.ru

## СТРУКТУРА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ИЗ МЕДИ М1 И СТАЛИ 20, СХЛОПНУТЫХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УДАРНЫХ ВОЛН

Методами металлографии, электронной микроскопии была исследована структура оболочек из стали 20 и меди марки М1, сошедшихся под действием ударных волн. Установлено, что деформационное поведение оболочек зависит от массовой скорости, величины давления в ударной волне и свойств материала самой оболочки. В схлопнутых образцах обнаружены три зоны: зона откола, центральная зона и зона деформации вблизи цилиндрической поверхности.

*Ключевые слова:* высокоскоростная деформация, ударные волны, рекристаллизация, кристаллизация, столбчатые кристаллы, откол.

**N.Yu. Frolova, V. I. Zeldovich, A. E. Kheifets, I. V. Khomskaya,  
E. B. Smirnov, A. A. Degtyarev, E. V. Shorokhov**

## THE STRUCTURE OF SHELLS FROM COPPER M1 AND STEEL 20 COLLAPSED SHELLS UNDER THE ACTION OF SHOCK WAVES

Using the methods of metallography and electron microscopy, we studied the structure of shells made of steel 20 and copper grade M1, converging under the action of shock waves. It was found that the deformation behavior of the shells de-

depends on the mass speed, the pressure in the shock wave, and the material properties of the shell itself. Three zones were found in collapsed samples: a spall zone, a central zone, and a deformation zone near a cylindrical surface.

*Key words:* high-speed deformation, shock waves, recrystallization, crystallization, columnar crystals.

Методами металлографии и электронной микроскопии проведено исследование структуры оболочек из стали 20 и меди марки М1, сошедшихся под действием ударных волн. Установлено, что завершение процесса схлопывания и конечный вид структуры в схлопнутых образцах зависит от толщины заряда, вида взрывчатого вещества (ВВ), массовой скорости оболочки, схемы нагружения и механических свойств нагружаемого материала. Показано, что во всех схлопнутых образцах образуются три зоны: зона откола, зона вблизи цилиндрической поверхности, центральная зона.

В средней части толщины оболочки под действием ударных волн возникает система трещин и пор, которые образуют зону откола. Если материал обладает высокой пластичностью (медь), то трещины заживают при последующем сжатии. При течении материала вблизи больших округлых пор происходит нагрев материала до температур плавления в этих участках. В структуре видны столбчатые кристаллы на месте большой поры. Если материал имеет меньшую пластичность (сталь 20), то в зоне откола не происходит заживление пор, остаются трещины и система пор.

При нагружении ударными волнами медных оболочек диаметром 48 мм варьировали толщину слоя ВВ. В зоне вблизи цилиндрической поверхности при сжатии оболочки на поверхности образуются впадины и выпуклости близкого размера. При нарушении симметрии сжатия наружная часть оболочки сминается, изгибается. Вблизи цилиндрической поверхности наблюдаются выпуклости и впадины разной величины. Наиболее высокие выпуклости соответствуют большему отставанию этих участков при сжатии. На гребнях изгибов в этих областях наблюдается веерообразное расположение вытянутых зерен. Смятая область частично отделена трещинами от центральной зоны.

В центральной зоне симметрично сошедшихся оболочек из меди наблюдаются радиальные выбросы материала. При полном сжатии промежутки между выбросами заживают полностью или частично.

В самом центре этой зоны наблюдаются рекристаллизованные зерна. При несимметричном схождении в центральной зоне не наблюдается правильная система выбросов. Вблизи отдельных пустот наблюдаются сильные течения, плавление с последующей кристаллизацией.

В стальной оболочке, в центральной зоне наблюдаются сильные течения материала в отдельных фрагментах, смятие этих фрагментов и откол фрагментов друг от друга.

*Работа выполнена в рамках государственного задания  
по теме «Структура» № АААА–А18–118020190116–6  
и при частичной поддержке УрО РАН (проект № 18–10–2–39).*